心理学报 2020, Vol. 52, No. 1, 12−25
Acta Psychologica Sinica DOI: 10.3724/SP.J.1041.2020.00012

认知重评和表达抑制情绪调节策略的脑网络分析：来自 EEG 和 ERP 的证据*

孙 岩 薄思雨 吕娇娇

(辽宁师范大学心理学院，大连 116029)

摘 要 本文旨在对认知重评和表达抑制两种常用情绪调节策略的自发脑网络特征及认知神经活动进行深入探讨。研究采集 36 名在校大学生的静息态和任务态脑电数据，经过源定位和图论分析发现节点效率与两种情绪调节显著相关的脑区，以及脑区之间的功能连接。研究结果表明，在使用认知重评进行情绪调节时会激活前额叶皮质、前扣带回、顶叶、海马旁回和枕叶等多个脑区，在使用表达抑制进行情绪调节时会激活前额叶皮质、顶叶、海马旁回、枕叶、颞叶和脑岛等多个脑区。因此，这些脑区的节点效率或功能连接强度可能成为评估个体使用认知重评和表达抑制调节情绪效果的指标。

关键词 情绪调节；认知重评；表达抑制；功能连接；图论

分类号 B842; B845

1 引言

有效的情绪调节是情商的核心。情绪调节是指个体对情绪的发生、体验与表达施加影响的过程(Gross, 1998)。人类每天都在有意识或无意识的对情绪进行调节(Gross, 1998)，以求适应环境的要求。Gross 提出以下 5 种情绪调节策略，包括情景选择、情景修正、注意分配、认知重评和表达抑制(Gross, 1998)。其中认知重评(cognitive reappraisal, CR)和表达抑制(expressive suppression, ES)是两种常见的情绪调节策略(娄熠雪，蔡阿燕，杨洁敏，袁加锦，2014)。CR 是一种先行关注(antecedent-focused)的策略，是指对情绪事件的重新解释，改变情绪反应的轨迹；而 ES 则是一种反应关注(response-focused)的策略，是指抑制与情绪反应相关的行为(Goldin, McRae, Ramel, & Gross, 2008)。例如，个体可以说服自己这是为了让自己得到进步获得更好发展的一种激励，这种策略是 CR；当个体被严厉的批评后感到愤怒时，会对愤怒的情绪进行抑制，这种策略是 ES。

近几年，随着神经生理手段的发展，为了探索两种情绪调节策略之间差异的根源以及两种策略之间思维方式的神经相关性。一部分研究是通过对负性情绪图片或电影片段进行 CR 和 ES 时的神经活动变化，探索两种情绪调节策略之间的异同。结果发现，两种情绪调节策略的使用均与前额叶皮质系统的神经活动高度相关，包括背外侧前额叶皮层(dorsolateral prefrontal cortex, DLPFC)，前扣带皮层(dorsal anterior cingulate cortex, dACC)和腹内侧前额叶皮层(ventromedial prefrontal cortex, VMPFC) (Giuliani, Drabant, & Gross, 2011b; Hermann, Bieber, Keck, Vaitl, & Stark, 2014; Ochsner, Bunge, Gross, & Gabrieli, 2002; Ohira et al., 2006; Phan et al., 2005)。而与两种情绪调节策略相关脑区不一致的是，许多功能成像研究显示背内、外侧前额叶皮质(prefrontal cortex, PFC)、腹外侧 PFC、脑岛、颞叶、顶叶和杏仁核参与 CR (Buhle et al., 2014; Gross, 2015; Hermann et al., 2014)；腹外侧前额叶皮质、额

收稿日期: 2018-09-21

* 教育部人文社会科学规划基金项目(17YJA190011)和辽宁省教育厅项目(WJ2019015)资助。

通信作者：孙岩, E-mail: sunyan@lnnu.edu.cn

下回、脑岛和杏仁核参与 ES (Goldin et al., 2008; Lee, Dolan, & Critchley, 2008)。

除此之外也有研究探讨情绪调节的个体差异，即 CR 和 ES 的习惯性使用与大脑结构和功能的关系，通常将脑区的激活和灰质体积与情绪调节问卷做相关分析。结果发现, CR 与背外侧前额叶皮层、腹内侧 PFC、背侧前扣带皮层和杏仁核的结构变化有关(Giuliani et al., 2011b; Hermann et al., 2014; 2013; Scult, Knodt, Swartz, Brigidi, & Hariri, 2017), 而腹内侧 PFC、背侧前扣带皮层、背内侧 PFC、额上回和脑岛的结构变化与 ES 相关(Giuliani, Drabant, Bhatnagar, & Gross, 2011a; Hermann et al., 2014; Li et al., 2017; Wang et al., 2017)。另外，习惯性使用 CR 与杏仁核激活减少有关(Drabant, Mcrae, Manuck, Hariri, & Gross, 2008)，ES 与前额叶和顶叶激活增加有关(Pan et al., 2018)。此外，还发现 CR 的习惯性使用与 dACC 体积呈正相关(Giuliani et al., 2011b)。习惯性使用 ES 与内侧前额叶皮质激活减少有关(Hermann et al., 2014)，并与脑岛体积之间呈正相关关系(Giuliani et al, 2011a)。最近有研究基于图论分析发现 ES 与前额网络和默认模式网络的全局效率显著相关(Pan et al., 2018)。该发现增强了对情绪调节神经机制的理解，揭示了 ES 与脑网络的有效组织之间的关系。

综上所述，我们发现，CR 和 ES 这两种情绪调节策略的神经机制既有相似性又各具差异性。尽管通过这两种策略的研究已经发现了前额叶皮质、前扣带回、脑岛等脑区在情绪调节中的重要作用，但是未发现有文献对情绪调节的认知过程与大脑静息状态 EEG 活动之间的关系进行研究。因此，为了探索两种情绪调节策略之间的自发脑网络特征，本研究尝试从时间序列角度，进一步丰富两种策略脑机制的异同。另外，认知神经科学研究和实践依赖于认知任务测量作为大脑功能的指标，可以用事件相关电位(event related potential, ERP)评估刺激–反应过程中的神经活动。但是这些认知过程与大脑静息状态 EEG 活动之间的关系是不清楚的。近年来已经有研究发现这种静息活动可以预测行为结果，揭示大脑内在活动对反应输出的功能相关性(Karamacoska, Barry, & Steiner, 2017; Karamacoska, Barry, Steiner, Coleman, & Wilson, 2018)。为了增加结果的可靠性，本研究将深入探讨 CR 和 ES 的神经活动变化，及其与大脑内在网络特征的关系。基于此，本研究假设两种情绪调节都会涉及与情绪认知控制相关的脑区，但与两种情绪调节神经活动相关的功能脑区也有显著差异，这种差异与它们不同的情绪调节效果显著相关。

以往神经影像学研究表明，由于人类大脑是一个高度整合和相互协作的复杂系统，在这个系统中，即使在静息状态，信息也会不断地被整合，这种正在进行的信息整合使我们能够评估周围的世界，并迅速和灵活地对复杂情况作出反应(van den Heuvel, Stam, Kahn, & Hulshoff Pol, 2009)，探索大脑区域之间相互整合的静息状态，有助于我们理解功能脑网络的基础架构以及大脑区域之间传递信息的方式(van den Heuvel & Hulshoff Pol, 2010)。目前人们越来越关注基于图论的分析来研究大脑的结构和功能，这种分析认为大脑是由节点(大脑区域)和边(区域之间的结构或功能连接)组成的复杂网络；复杂网络的拓扑性质可以通过各种测量来评估，其中网络效率表示大脑区域之间信息交换效率的一种度量标准，可用于衡量大脑网络的全局功能(Pan et al., 2018)，效率是更具生物学相关性的度量(Wang, Zuo, & He, 2010)。本研究的目标是探讨与两种情绪调节策略相关的自发大脑网络之间的信息交换效率，以及它们之间的差异性，因此选择节点效率作为探讨两种情绪调节策略的度量指标。

脑电图(electrophysiological, EEG)的时间序列数据与大脑皮质中动态突触后活动(dynamic postsynaptic activity)直接相关，可以直接测量神经元活动，具有较高的时间分辨率(Canuet et al., 2011)。并且 EEG 可以评估快速和滞后的自发性大脑活动的时间和频率，从而能够表征内在的功能脑网络(Pei, Wang, Deng, Wei, & Yu, 2014; van Diessen et al., 2015)。另外，大脑采用不同频率的同步活动来实现其功能，根据以往的研究发现在情绪调节中，相关的 EEG 信息主要在低频带编码，特别是在 theta 范围内(Balconi, Grippa, & Vanutelli, 2015; Ertl, Hildebrandt, Ourina, Leicht, & Mulert, 2013; Qian et al., 2014; Xing et al., 2016)，该频带是神经系统中功能信号的重要成分之一(Zhang et al., 2013)，它与注意力和情绪有关(Balconi et al., 2015)，能反映情绪调节神经机制(Zhang et al., 2013)。因此本研究选择 theta 频带探讨两种情绪调节自发脑功能活动以及它们的网络效率。

最近已有研究使用功能性核磁共振(functional magnetic resonance imaging, fMRI)和情绪调节问卷进行研究，结果发现额上回与包括内侧 PFC、楔前

叶和海马旁回在内的区域之间的功能连接与 ES 的性别差异有关(Wang et al., 2017)。功能连接是指在不同大脑区域测得的神经生理指标的时间相关性(Nallasamy & Tsao, 2011)。为了揭示与认知重评和表达抑制相关的功能网络的协同工作方式，本研究采用连通性分析找到与两种情绪调节心理估量相关脑区的功能连接，分析比较两者之间的异同，将帮助我们了解两种情绪调节策略的自发脑机制，从而将神经机制与个人的情感体验、社会行为相结合，有助于临床实践和心理健康的干预。同时使用图论中的节点效率来度量与两种情绪调节相关脑区的网络效率，并分析其随着情绪调节策略的不同其心理估量的变化趋势，有助于明确 CR 和 ES 调节效率的生物标记脑区。LPP 一般开始于刺激呈现后约 300 ms，并能在整个刺激呈现期间持续(王敬欣，王春梅，谢芳，常敏，张阔, 2015)。随着 CR 和 ES 认知情绪调节策略的使用，LPP 波幅减少(Dennis & Hajcak, 2009; Foti & Hajcak, 2008; Hajcak & Nieuwenhuis, 2006; Moser, Hajcak, Bukay, & Simons, 2006)。因此本研究使用两种情绪调节状态下的 LPP 波幅，进一步探讨情绪调节策略与大脑内在的功能连接和节点效率之间的关系。

2 材料和方法

2.1 被试

共招募 41 名在校大学生有偿参加实验。实验在一个隔音良好的房间进行，被试舒适地坐在椅子上。本研究是被试内设计，在实验开始前向被试说明实验要求，采集每位被试的静息 EEG 数据，然后每位被试参加图片观看任务。其中 3 名被试因数据缺失被删除，有 2 名被试由于脑电数据伪迹较多被删除。最后 36 名有效被试(男 17 人，女 19 人，年龄范围 17~28 岁，平均年龄 21.8 ± 2.5 岁)纳入随后的数据分析中。所有被试自我报告无情感障碍历史和使用精神药物的情况，均为右利手，视力正常或矫正视力正常。本研究得到伦理审查委员会的批准，并且每名被试在实验前签署知情同意书。

2.2 研究工具和程序

2.2.1 情绪调节问卷

采用 Gross 和 John (2003)编制的情绪调节问卷，该问卷旨在评估个体习惯性使用 CR 和 ES 两种情绪调节策略的水平。问卷包括 10 个项目，其中项目 1、3、5、7、8 和 10 测量认知重评；项目 2、4、6 和 9 测量表达抑制。问卷为 7 点 Likert 量表，要求被试根据自身的情况从 1 (完全不同意)到 7 (完全同意)对每个项目进行评分。该问卷中文版信效度良好。问卷 CR 维度的内部一致性信度为 0.85，重测信度为 0.82; ES 维度的内部一致性信度为 0.77，重测信度为 0.79 (王力，柳恒超，李中权，杜卫，2007)。问卷已经被广泛使用(崔向军，逯春洁，郭永芳，石贺敏, 2012; 李中权，王力，张厚粲，柳恒超，2010)。

2.2.2 实验刺激和任务

本研究采用 block 设计的图片观看任务。任务有 4 种类型：观看(中性图片)，观看(负性图片), CR (负性图片)和 ES (负性图片)。对于观看的任务，要求被试简单地观看所呈现的图片，使他们体验自身的想法和感受。对于 CR 任务，要求被试重新解释负性图片的含义，为其赋予更加积极的意义或者以独立的观察者视角看待负性图片。对于 ES 任务，要求被试尽量抑制当前或即将发生的情绪波动。

本实验采用伪随机依次呈现这 4 种类型的图片，本研究的刺激任务包括 4 个 block，每个 block 包括 40 张图片。第一个 block 由中性图片组成，作为一个无情绪的基线水平，以检验后面条件的情绪效应(观看中性)。在第二个 block 中，被试在不使用任何情绪调节策略的情况下观看 40 张负性图片(观看负性)。最后两个 block 分别要求被试在使用 CR (重评负性)或 ES (抑制负性)策略的情况下观看 40 张负性图片。所有图片均选自中国情绪图片系统(Chinese Affective Picture System, CAPS) (甘甜，罗跃嘉，张志杰, 2009)。CR 条件和 ES 条件的顺序在被试间平衡，从而避免负性情绪图片对中性刺激的影响，以及采用两种情绪调节策略先后顺序可能造成的误差。负性图片包括令人惊恐的动物、人类的攻击行为和身体残缺的场景，而中性图片则描述了中性的动物和人活动的场景。

2.2.3 实验程序

采用 E-Prime 2.0 专业软件编制实验程序，所有词汇通过电脑屏幕呈现，根据指导语的不同，被试做出相应的反应。每个 trial 开始时，在黑色屏幕中央呈现白色注视点，持续 1000 ms，然后出现另一个 1000 ms 的指令提示(简单观看，认知重评，表达抑制)，提示词消失后，在黑色电脑屏幕背景上呈现 2000 ms 的图片。图片呈现期间，要求被试按照指令认真观看每一张图片。为了帮助被试在不同的任务类型之间有效切换，根据指令类型对提示屏幕的背景进行颜色编码。每种任务类型的颜色如

下：紫色表示简单观看，蓝色表示认知重评，红色表示表达抑制。在每张图片消失后，被试对情绪效价和唤醒度进行 1~9 等级评分(Bradley & Lang, 1994)。实验过程中平均每 20 个 trial 被试休息一次，准备好后继续进行实验。实验过程如图 1 所示。

2.3　EEG 记录和预处理

采用德国 Brain-Product 公司的 ERP 记录与分析系统，按照 10-20 国际脑电记录系统的 64 导电极帽收集 EEG 信号。记录信号时, AFz 电极点为接地电极，FCz 为参考电极。右眼下方安置电极记录垂直眼电(VEOG)，滤波带宽为 0.01~100 Hz，A/D 采样频率为 500 Hz/导，每个电极点电阻低于 10 KΩ。要求被试舒适地坐在椅子上，闭眼保持清醒，同时记录静息脑电波 6 分钟。用 Brain Vision Analyzer 2.0 软件离线分析 EEG 数据。数据重参考采用参考电极标准技术(REST)的无限零参考，采样率降至 256 Hz。使用 0.1 Hz 的高通滤波器和 50 Hz 的低通滤波器对 EEG 数据进行滤波，采用独立成分分析剔除眼电成分，然后将 EEG 数据按照每 2 秒为一段进行分段，电压超过±150 μV 的电极信号被排除在外以减少伪迹。选择无伪迹的 EEG 数据用于后续分析。

2.4　功能连接分析

为了进一步确定与情绪调节功能相关的连通性脑区，使用标准化的低分辨率电子断层扫描软件(standardized Low Resolution Brain Electromagnetic Tomography, sLORETA) (Pascual-Marqui et al., 2011)对预处理后的头皮脑电波进行源定位和连通性分析，具有较好的定位效果(Wagner, Fuchs, & Kastner, 2004)。本研究采用 sLORETA 进行源定位分析，通过计算相位滞后指数(phase lag index, PLI)进行连通性分析，在空间无偏的滞后相位同步分析中，根据蒙特利尔神经学研究所(Montreal Neurological Institute, MNI)标准脑坐标系和布鲁德曼分区定位，通过源定位将 64 个电极位置的 MNI 坐标定义成 84 个感兴趣区域作为节点。使用 PLI 可以解决容积传导和有源参考电极在功能连接性评估中的问题(Stam, Nolte, & Daffertshofer, 2007)。根据下面公式从时间序列的相位差 $\Delta\varphi(t_k)$, k = 1…N 中获得 PLI：

$$PLI=|\langle \mathrm{sign}[\sin(\Delta\phi(t_k))]\rangle|$$

PLI 的范围在 0 到 1 之间，两个节点的 PLI 越高，两个节点对应的大脑区域之间的相关性越强。PLI 可有效检测功能网络的实际变化(Canuet et al., 2012; Fraga González et al., 2016; Pagani et al., 2012)。我们通过计算 theta 频带(4~8 Hz)的 84 个感兴趣区域之间的 PLI 值，为每位被试构建了无向加权的脑网络。

2.5　图论分析

图论中，图或网络是现实世界复杂系统的数学表达，效率是图论分析中表示大脑区域之间信息交换效率的一种度量(Pan et al., 2018)。本研究为了获得两种情绪调节显著相关脑区的节点效率，在 MATLAB 中采用 GRETNA (graph theoretical network analysis)软件进行图论分析(Wang et al., 2015)。通过相位滞后同步得到 84×84 功能连接矩阵后，应用阈值从相关矩阵计算邻接矩阵，得到二进制无向图。由于不同的阈值会生成不同连接密度或稀疏度的图形，因此一般建议在较宽的阈值范围内计算网络属性。本研究选择的阈值范围是 0.15~0.85 (Arnold, Protzner, Bray, Levy, & Iaria, 2014; Langer et al., 2012)。

2.6　ERP 数据处理

对任务脑电数据进行离线分析，设置低通滤波为 24 Hz，采用独立成分分析去除眼电成分。选取

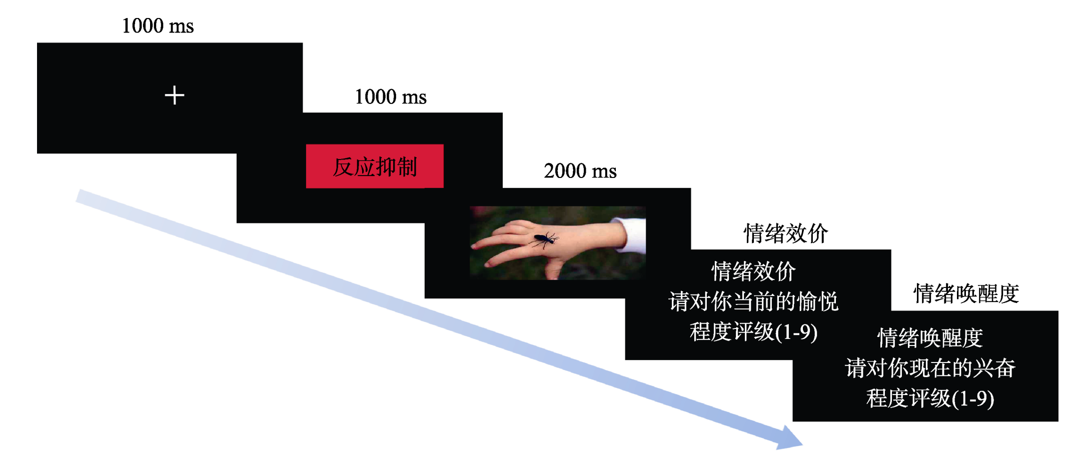


图 1　情绪调节任务的实验过程(以表达抑制任务为例)

波段为−200~2000 ms，基线为刺激呈现前 200 ms，进行基线校正后去伪迹。波幅超过± 100 μV 者视为伪迹自动剔除。对收集的脑电数据进行预处理后，分别对每个条件下的 ERP 活动进行叠加平均。根据先前研究和本研究的目的，选取额叶(F3, Fz, F4)，中央(C3, Cz, C4)和顶叶(P3, Pz, P4)的 9 个电极点进行统计分析(Amrhein, Mühlberger, Pauli, & Wiedemann, 2004; Langeslag, Jansma, Franken, & Strien, 2007; Langeslag & van Strien, 2017; 王一牛, 周立明, 曲琛, 罗跃嘉, 2007)。

2.7 相关分析

为了得到与认知重评和表达抑制相关的功能连接和网络效率，并进一步探讨在两种情绪调节策略下的情绪调节效果与静息状态下脑网络自发活动的关系，将每位被试 theta 频带下的 84 个布鲁德曼脑区的节点效率，以及每个布鲁德曼脑区对之间的相位滞后同步值，分别与情绪调节两个分量表评分以及 LPP 波幅做相关分析。为了消除性别和年龄的影响，将性别和年龄作为协变量(Wang et al., 2017)，所有结果均进行多重检验 Bonferroni 校正。相关分析使用 GRETNA 完成。

3 结果

3.1 问卷结果

情绪调节问卷的两个分量表的平均得分为：CR 为 30.14 (SD = 4.20)，ES 为 15.63 (SD = 3.24)。CR 和 ES 的评分在统计学上相关不显著(r = −0.126, p = 0.47)。

3.2 功能连接

对每位被试构建一个 84×84 的功能连接矩阵，共 7056 个相位滞后指数值与情绪调节的两个分量表得分作相关，计算 theta 频带下与 CR 和 ES 相关脑区之间的功能连接，并比较两种情绪调节策略之间的异同。我们将所有结果进行多重比较 Bonferroni 校正，并且选择显著性 $p < 0.001$ 的结果，见表 1。为了将与 CR 和 ES 相关的功能连接脑区更清晰地呈现出来，使用 BrainNet Viewer 画出脑图，如图 2 所示。

3.3 节点效率

GRETNA 相关性分析发现，theta 频带的节点效率存在与情绪调节分量表评分显著相关的脑区，结

表 1 theta 频带下相位滞后同步与 CR 和 ES 评分相关显著的功能连接脑区

情绪调节策略	脑区	r	p
CR	顶叶(中央后回)−额叶(额下回/额中回) (1R-46R)	0.63***	0.00049
ES	海马旁回−额下回/额中回/脑岛(35L-47R)	0.61***	0.00012
	海马旁回−顶叶(顶下回) (37L-40L)	0.60***	0.00014
	额下回/额中回/脑岛−海马旁回(47L-36R)	0.56***	0.00046
	海马旁回−额下回/额中回/脑岛(28L-47R)	0.55***	0.00063
	额下回/额中回/脑岛−海马旁回(47L-35R)	0.54***	0.00082

注：*** $p < 0.001$, Bonferroni 校正。

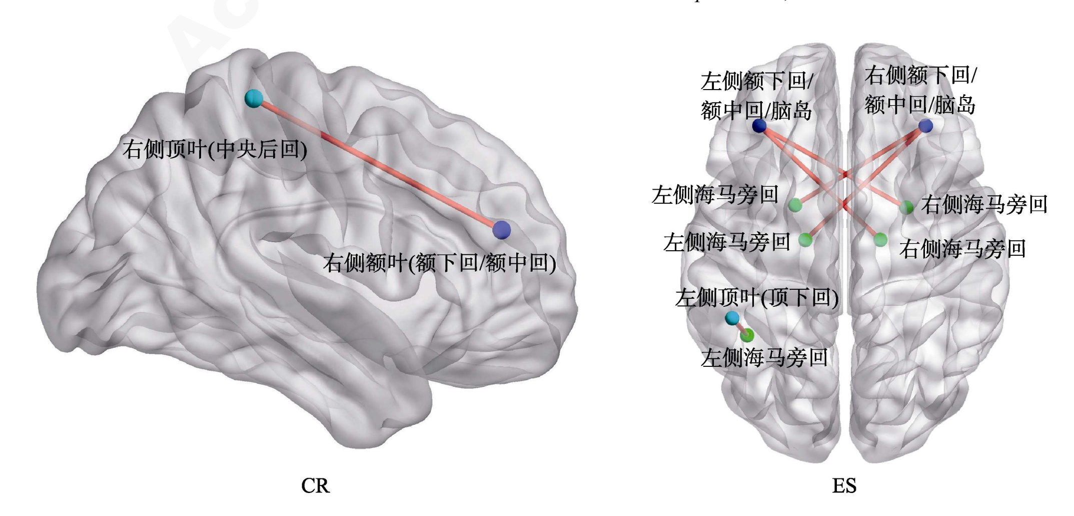


图 2 theta 频带下相位滞后同步与 CR 和 ES 心理估计变量(即情绪调节两个分量表评分)相关显著的功能连接脑区($p < 0.001$, Bonferroni 校正)。左图表示在 theta 频带下 EEG 信号与被试的 CR 得分相关显著的功能连接脑区；右图表示在该频带下 EEG 信号与被试的 ES 得分相关显著的功能连接脑区。红色线表示连接的两个布鲁德曼脑区之间功能上的同步性与情绪调节得分呈显著正相关。

表 2　theta 频带下节点效率与 CR 和 ES 评分相关显著的脑区

CR			ES		
脑区	r	p	脑区	r	p
前额中央后回(4R)	−0.51**	0.0016	额下回/额中回/脑岛(47R)	0.36*	0.034
顶叶中央后回(3R)	−0.43*	0.010	前额叶皮层(6L)	−0.34*	0.044
前扣带回(25L)	−0.35*	0.041	内侧前额叶皮层(11R)	−0.34*	0.049

注: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, Bonferroni 校正。

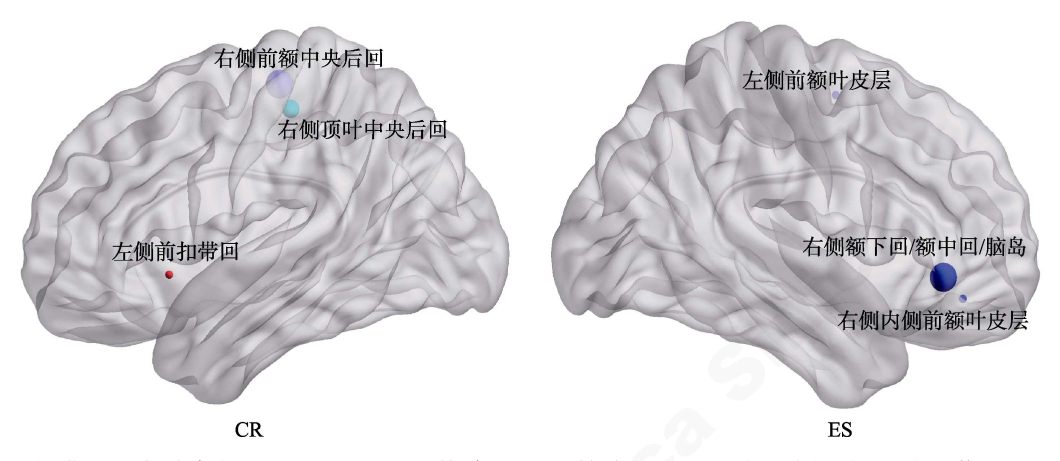


图 3　theta 频带下节点效率与 CR 和 ES 心理估计变量(即情绪调节两个分量表评分)相关显著的脑区($p < 0.05$, Bonferroni 校正)。左图表示 theta 频带下节点效率与被试的 CR 得分相关显著的脑区，右图表示 theta 频带下节点效率与被试的 ES 得分相关显著的脑区。图中圆点位置表示对应的布鲁德曼脑区，圆点大小表示相关的显著性程度，越大表示两者相关越显著。

果见表 2，为了更清晰地呈现出与 CR 和 ES 显著相关的节点，使用 BrainNet Viewer 画出脑图，如图 3 所示。

3.4　LPP

所有被试叠加平均后在观看中性、观看负性、重评负性和抑制负性条件下的 LPP 脑电如图 4 所示。根据以往研究，我们最终选取 400~800 ms 的 LPP 脑电波幅进行分析(Gu, Chen, Xing, Zhao, & Li, 2019; Shigeto, Ishiguro, & Nittono, 2011; Varnum & Hampton, 2016)，4 种条件下的 LPP 波幅进行单因素方差分析并未发现有显著差异，$F(3, 140) = 0.897$, $p = 0.445$。

GRETNA 相关性分析发现，性别和年龄作为控制变量，通过计算每位被试在情绪调节策略下调节负性−观看中性的 LPP 平均波幅差异值，分别与 theta 频带的脑区之间的功能连接和网络效率进行相关分析，发现其显著脑区，结果见表 3、表 4、图 5 和图 6。

4　讨论

4.1　功能连接

为了探索 CR 和 ES 两种常用情绪调节策略的自发脑网络特征，及与两种情绪调节策略下调节效果之间的关系。使用基于 EEG 的连通性和图论，对静息状态的 CR 和 ES 大脑连接的拓扑组织以及 LPP 波幅进行研究。

本研究从整体上对与情绪调节相关功能性脑区的同步活动进行探讨。如图 2 所示，功能连接的结果发现，在 theta 频带下与 CR 心理测量得分相关显著的脑区有顶叶中央后回和额中回/额下回，而与 ES 心理测量得分相关显著的脑区有顶下回、脑岛、海马旁回和额中回/额下回。同时，本研究在与

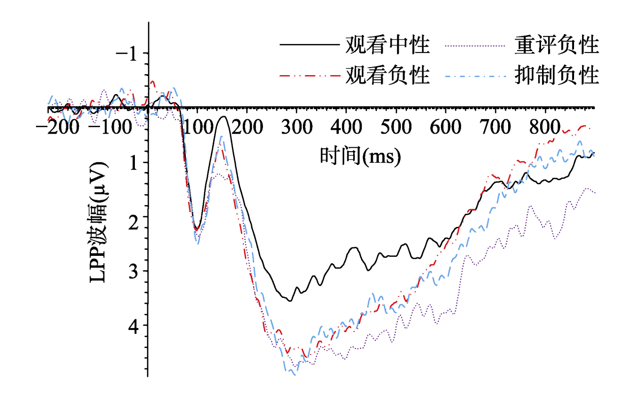


图 4　观看中性、观看负性、重评负性和抑制负性条件下，在 F3、Fz、F4、C3、Cz、C4、P3、Pz 和 P4 上诱发脑电的总平均图。

表 3 LPP 波幅和 theta 频带下相位滞后同步相关显著的脑区

CR			ES		
脑区	*r*	*p*	脑区	*r*	*p*
			颞下回(20L)–额上回(8R)	0.66***	0.000016
海马旁回(37L)–海马旁回(37R)	−0.72***	0.0000014	海马旁回(35L)–海马旁回(36L)	0.64***	0.000036
			顶上回(5L)–海马旁回(34L)	0.63***	0.000057
额内侧回\额上回\额下回(10L)–内侧前额叶皮层(11R)	−0.60***	0.00015	海马旁回(36L)–额上回(8R)	0.57***	0.00034
			中央后回(3R)–额上回(8R)	0.57***	0.00038
			顶上回(5L)–海马旁回(28L)	0.56***	0.00043
			额上回(8L)–颞下回(20L)	0.55***	0.00060

注：*** $p < 0.001$, Bonferroni 校正。

表 4 LPP 波幅和 theta 频带下节点效率相关显著的脑区

CR			ES		
脑区	*r*	*p*	脑区	*r*	*p*
顶叶中央后回(1L)	0.44**	0.0088	额上回(8R)	0.37*	0.031
海马旁回(37L)	−0.41*	0.013			
枕下回(17L)	−0.35*	0.040	枕下回(17L)	−0.34*	0.043

注: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, Bonferroni 校正。

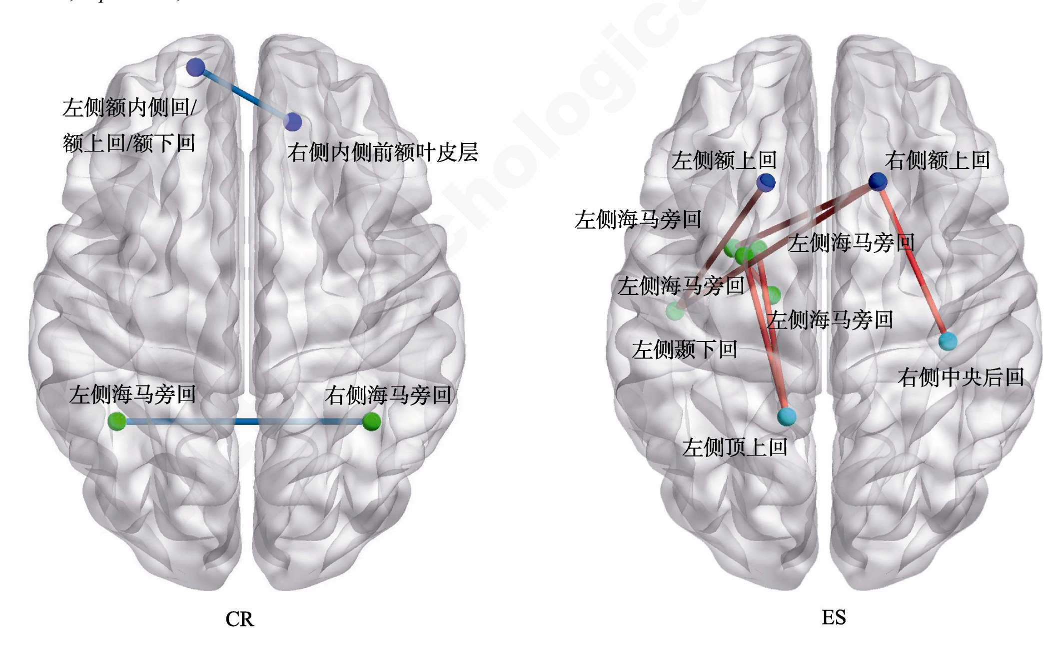


图 5 LPP 波幅和 theta 频带下相位滞后同步相关显著的脑区($p < 0.001$, Bonferroni 校正)。左图表示在 theta 频带下 EEG 信号与被试的 CR 条件下 LPP 波幅相关显著的功能连接脑区；右图表示在该频带下 EEG 信号与被试的 ES 条件下 LPP 波幅相关显著的功能连接脑区。红色线表示连接的两个布鲁德曼脑区之间功能上的同步性与情绪调节得分呈显著正相关。蓝色线表示连接的两个布鲁德曼脑区之间功能上的同步性与情绪调节得分呈显著负相关。

CR 的 LPP 波幅显著相关的功能脑区中发现了前额叶皮质和海马旁回，而与 ES 的 LPP 波幅显著相关的功能脑区中发现了颞下回、海马旁回、顶上回和额上回，如图 5 所示。这些结果对静息 EEG 结果进行了补充和验证。同时可以揭示大脑内在活动对反应输出的功能相关性(Karamacoska et al., 2017; Karamacoska et al., 2018)。这些相关脑区之间的功能连接强弱可能有助于揭示 CR 和 ES 情绪调节策略使用的效果。

综上所述，本研究发现两种策略涉及的脑区有较多一致性，包括顶叶、前额叶皮质和海马旁回。本研究结果与以往研究结果一致，前额叶皮质、顶叶和海马旁回与 CR 有关(Deak et al., 2017; Duncan & Owen, 2000; Miller & Cohen, 2001; Nelson, Fitzgerald,

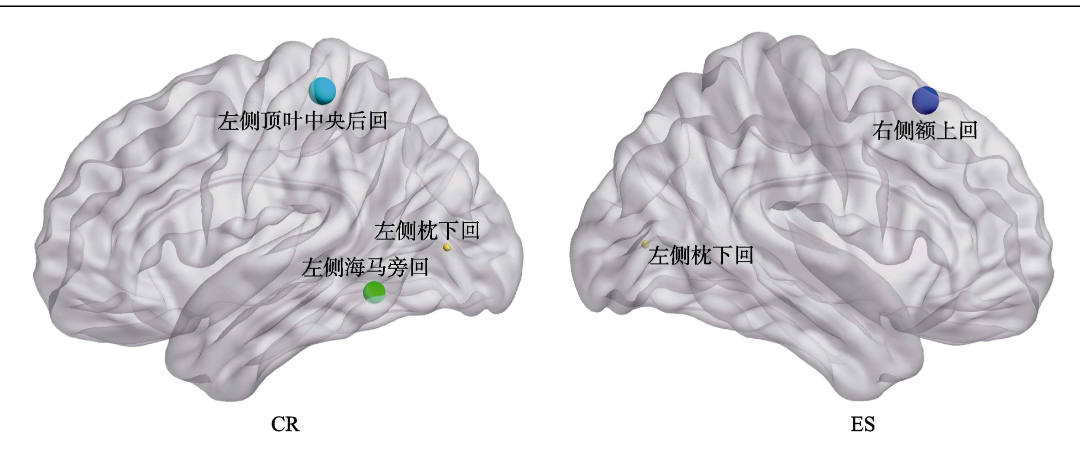


图 6　LPP 波幅和 theta 频带下节点效率相关显著的脑区($p < 0.05$, Bonferroni 校正)。左图表示 theta 频带下节点效率与被试的 CR 条件下 LPP 波幅相关显著的脑区，右图表示 theta 频带下节点效率与被试的 ES 条件下 LPP 波幅相关显著的脑区。图中圆点位置表示对应的布鲁德曼脑区，圆点大小表示相关的显著性程度，越大表示两者相关越显著。

Klumpp, Shankman, & Phan, 2015; Vanderhasselt, Kuhn, & De Raedt, 2013); 前额叶皮质、海马旁回和顶叶与 ES 有关(Hermann et al., 2014; Li et al., 2017; Vanderhasselt et al., 2013; Wang et al., 2017)。有研究发现前额叶皮质可以与顶叶(与注意力定向相关的皮层区域)一起传达和处理与动机优先或行为相关的信息输入，编码情绪信息的个体差异与前额叶皮质和顶叶区域的调节显著相关(Viviani, 2014)。本研究结果表明，如果个体习惯使用 CR 和 ES 情绪调节策略，则其前额叶皮质和顶叶之间的功能连接可能会增强，其编码情绪信息的能力可能也会提升。海马旁回主要功能与记忆处理有关，特别是情景记忆的编码和检索(Frank et al., 2014; Hamann, 2001)。Deak 等人(2017)的研究发现，在 CR 过程中，海马旁回的活动增强表明，人们利用语义知觉过程来构建对同一情境的不同解释，并增强对情感刺激的记忆。此外，人们似乎拥有强烈的意识，使他们把注意力从外部信息转移到内部信息，以检测环境变化。这些认知过程可以使他们迅速调整自己的行为。在 ES 中，个体更倾向于抑制自身的外在情感表达和回忆过去的经历，有研究发现在表达抑制过程中，额上回和海马旁回之间的功能连接增强，当个体在压抑自己的情绪时，会使用认知资源来控制负面经历的记忆(Wang et al., 2017)。也有研究发现前额叶皮质和海马旁回可能对陈述性记忆有独特的贡献(Krach et al., 2010; Samuelson, 2011)。这些研究结果表明，顶叶、前额叶皮质和海马旁回之间的协同作用，可能在情绪调节过程中扮演重要角色。

4.2　节点效率

效率是代表大脑区域之间信息交换效率的一种度量指标。本研究发现了 CR 和 ES 两种情绪调节策略的使用习惯与静息状态脑网络节点效率之间的关系。正相关表明越频繁使用 CR 或 ES 来调节个体的情绪，该区域的节点效率即信息交换能力越强。

如图 3 所示，本研究在 theta 频带下发现 CR 得分与前额中央后回、顶叶中央后回和前扣带回的节点效率呈显著负相关。如图 6 所示，本研究发现 CR 条件下的 LPP 波幅与海马旁回和枕下回呈显著负相关，而与顶叶中央后回的节点效率呈显著正相关。这说明当海马旁回和枕叶的节点效率越高，采用 CR 进行情绪调节时的效果可能越差；而顶叶中央后回的节点效率越高，采用 CR 进行情绪调节时的效果可能越好。

另外，本研究在 theta 频带发现 ES 得分与额下回/额中回/脑岛的节点效率呈显著正相关，而与前额叶皮质呈显著负相关，如图 3 所示。本研究也发现 ES 条件下的 LPP 波幅与枕下回的节点效率呈显著负相关，而与额上回的节点效率呈显著正相关，如图 6 所示。这说明当枕叶的节点效率越高，使用 ES 进行情绪调节时的效果可能越差；而额上回的节点效率越高，使用 ES 进行情绪调节时的效果可能越好。

本研究从整体上对情绪调节策略与网络效率相关的脑区进行探讨，结果发现，在 theta 频带下与 CR 和 ES 均相关显著的脑区是前额叶皮质和枕叶。编码情绪信息的能力与前额叶皮层显著相关(Viviani, 2014)。同时，前额叶也是控制思维和行为的重要脑区(Egner & Hirsch, 2005)，并参与各种认知控制任务(Badre & Wagner, 2004)，有研究已发现

内侧前额叶参与 ES (Goldin et al., 2008; Li et al., 2017)。此外, 也有研究发现, 当个体调节负性情绪时会伴随枕叶的激活(Urbain, Sato, Pang, & Taylor, 2017)。由此可见, 前额叶皮质和枕叶可能在情绪调节过程中起到非常重要的作用。另外, 本研究发现两种情绪调节策略与对应节点效率相关不一致的脑区是海马旁回和顶叶中央后回, 这些脑区的节点效率只与 CR 的 LPP 波幅呈显著相关, 这与本研究在 CR 涉及的功能脑区中得到的结果一致。

4.3 综合启示

本文通过研究与情绪调节相关脑区之间的功能连接和网络效率, 发现两种情绪调节策略涉及的脑区有很多是一致的, 包括前额叶皮质、海马旁回、顶叶和枕叶。除此之外, 我们也发现两种情绪调节策略之间不一致的相关脑区, 主要表现在 CR 与前扣带回显著相关, ES 与颞叶和脑岛显著相关。前扣带回是皮质边缘系统的一部分, 并且作为认知和情感网络的中心枢纽, 从广义上讲, 延髓前扣带回涉及情绪的隐性调控(Egner, Etkin, Gale, & Hirsch, 2008; Etkin, Egner, Peraza, Kandel, & Hirsch, 2006; Ochsner, Hughes, Robertson, Cooper, & Gabrieli, 2009)和评估功能(Bush, Luu, & Posner, 2000)。McRae 等人(2010)发现在 CR 情绪调节过程中, 前额叶皮质和扣带回区域的活动增加。事实上, 与以往研究一致, 前扣带回区域激活在 CR 和情绪认知调节过程中对脑功能的检测起着重要作用(Giuliani et al., 2011b; Ohmatsu et al., 2014)。前扣带回的激活与检测反应冲突和注意力控制有关(Barch, Braver, Akbudak, & Ollinger, 2000; Braver, Barch, Gray, Molfese, & Snyder, 2001; Liu, Banich, Jacobson, & Tanabe, 2004), 可能反映了注意力向积极方向的转移(Zhao et al., 2012)。本研究结果表明, 在使用 CR 进行情绪调节时会激活前扣带回, 可能会更加有效地调节负性情绪, 更加有利于个体的身心健康(程利, 袁加锦, 何媛媛, 李红, 2009)。颞叶与情绪信息的加工处理有关(Batut et al., 2006; Szaflarski et al., 2014), 尤其是在情绪记忆方面(Buchanan, Tranel, & Adolphs, 2006; Dolcos, Labar, & Cabeza, 2004; Dougal, Phelps, & Davachi, 2007)。也有研究发现, 颞叶与 ES 有关(Goldin et al., 2008), 这可能说明在 ES 中也会涉及多种信息的记忆和整合。脑岛是非常稳定的脑结构, 并与总皮质体积高度相关(Makris et al., 2006)。ES 是一种需要内在感受性和情感意识的情绪调节策略(Giuliani et al., 2011a), 脑岛是人们感知身体生理状态信息(即内在感受)与情绪体验整合的主要脑区(Cauda et al., 2012), 有研究发现 ES 可以增强脑岛的激活(Goldin et al., 2008; Pannu et al., 2010)。因此脑岛可能在 ES 中起重要作用(Giuliani et al., 2011a)。

另外, 我们也发现 ES 与额中回/额下回、顶上回、顶下回、颞下回、额上回、脑岛和海马旁回之间的功能连接都呈显著正相关。以往核磁研究发现抑郁症患者默认网络功能联结增强(Zhou et al., 2010), 默认网络包括后扣带皮层、外侧顶叶皮质/角回脾后皮质、内侧前额叶皮层、额上回、海马旁回和颞叶等(Alizadeh, Fatemizadeh, & Deevband, 2014), 可能和抑郁症状如认知控制能力、情绪调节能力下降等具有重要关系(Sheline, Price, Yan, & Mintun, 2010)。ES 一般与消极的情感和社会后果有关(Butler et al., 2003; Goldin et al., 2008; Gross, 2002; Gross & John, 2003; Haga, Kraft, & Corby, 2009; Hofmann, Heering, Sawyer, & Asnaani, 2009; Langner, Epel, Matthews, Moskowitz, & Adler, 2012), Gross 和 John (2003)也发现, 较高的 ES 评分与较高的心理困扰相关。有研究发现 ES 与创伤后应激障碍、焦虑和抑郁症状相关(D' Avanzato, Joormann, Siemer, & Gotlib, 2013; Dennis, 2007; Garnefski & Kraaij, 2007; Moore, Zoellner, & Mollenholt, 2008)。而本研究结果表明, 越习惯使用 ES 进行情绪调节的个体, 其前额叶皮质、颞叶、顶叶、脑岛和海马旁回脑区之间的功能连接可能会增强。这些结果表明, 长期使用 ES 进行情绪调节可能容易导致消极的情感后果, 从而对这些默认功能脑区的同步活动产生影响。这可能有助于解释习惯使用 ES 的个体在面对生活压力时容易产生持续的消极情绪。

尽管如此, 本研究仍是对情绪调节与复杂脑网络之间关系进行的初步探索, 仍存在一些局限性。如情绪调节中各个节点(区域)的角色可以采用更多的拓扑属性来评价, 并进一步探讨情绪调节与复杂脑网络之间的关系。未来可以进一步设计实验进行更具体的实证研究。

5 结论

本研究得到以下结论: (1)习惯使用认知重评的个体进行情绪调节时会激活前额叶皮质、前扣带回和顶叶等多个脑区, 而习惯使用表达抑制的个体进行情绪调节时会激活前额叶皮质、顶叶、脑岛和海马旁回等多个脑区。(2)与认知重评条件下的 LPP

波幅呈显著相关的脑区有顶叶、前额叶皮质、海马旁回和枕叶，而与表达抑制条件下的LPP波幅呈显著相关的脑区有顶叶、前额叶皮质、海马旁回、枕叶和颞叶。这些脑区的节点效率和功能连接强度可能成为评估个体使用认知重评和表达抑制调节情绪效果的指标。

参　考　文　献

Alizadeh, A., Fatemizadeh, E., & Deevband, M. R. (2014, November). *Investigation of Brain Default Network's activation in autism spectrum disorders Using Group Independent Component Analysis*. 21st Iranian Conference on Biomedical Engineering (ICBME 2014), Biomedical Engineering Faculty, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran.

Amrhein, C., Mühlberger, A., Pauli, P., & Wiedemann, G. (2004). Modulation of event-related brain potentials during affective picture processing: A complement to startle reflex and skin conductance response? *International Journal of Psychophysiology, 54*(3), 231–240.

Arnold, A. E. G. F., Protzner, A. B., Bray, S., Levy, R. M., & Iaria, G. (2014). Neural network configuration and efficiency underlies individual differences in spatial orientation ability. *Journal of Cognitive Neuroscience, 26*(2), 380–394.

Badre, D., & Wagner, A. D. (2004). Selection, integration, and conflict monitoring: Assessing the nature and generality of prefrontal cognitive control mechanisms. *Neuron, 41*(3), 473–487.

Balconi, M., Grippa, E., & Vanutelli, M. E. (2015). What hemodynamic (FNIRs), electrophysiological (EEG) and autonomic integrated measures can tell us about emotional processing. *Brain and Cognition, 95*, 67–76.

Barch, D., Braver, T., Akbudak, E., & Ollinger, J. (2000). Anterior cingulate cortex and response conflict: Effects of response modality and processing domain. *Neuroimage, 11*(5), S104–S104.

Batut, A. C., Gounot, D., Namer, I. J., Hirsch, E., Kehrli, P., & Metz-Lutz, M. N. (2006). Neural responses associated with positive and negative emotion processing in patients with left versus right temporal lobe epilepsy. *Epilepsy & Behavior, 9*(3), 415–423.

Bradley, M. M., & Lang, P. J. (1994). Measuring emotion: The self-assessment manikin and the semantic differential. *Journal of Behavior Therapy and Experimental Psychiatry, 25*(1), 49–59.

Braver, T. S., Barch, D. M., Gray, J. R., Molfese, D. L., & Snyder, A. (2001). Anterior cingulate cortex and response conflict: Effects of frequency, inhibition and errors. *Cerebral Cortex, 11*(9), 825–836.

Buchanan, T. W., Tranel, D., & Adolphs, R. (2006). Memories for emotional autobiographical events following unilateral damage to medial temporal lobe. *Brain, 129*(1), 115–127.

Buhle, J. T., Silvers, J. A., Wager, T. D., Lopez, R., Onyemekwu, C., Kober, H., … Ochsner. K. N. (2014). Cognitive reappraisal of emotion: A meta-analysis of human neuroimaging studies. *Cerebral Cortex, 24*(11), 2981–2990.

Bush, G., Luu, P., & Posner, M. I. (2000). Cognitive and emotional influences in anterior cingulate cortex. *Trends in Cognitive Sciences, 4*(6), 215–222.

Butler, E. A., Egloff, B., Wlhelm, F. H., Smith, N. C., Erickson, E. A., & Gross, J. J. (2003). The social consequences of expressive suppression. *Emotion, 3*(1), 48–67.

Canuet, L., Ishii, R., Pascual-Marqui, R. D., Iwase, M., Kurimoto, R., Aoki, Y., … Takeda, M. (2011). Resting-state EEG source localization and functional connectivity in schizophrenia-like psychosis of epilepsy. *PLOS ONE, 6*(11), e27863.

Canuet, L., Tellado, I., Couceiro, V., Fraile, C., Fernandez-Novoa, L., & Ishii, R. … Cacabelos, R. (2012). Resting-state network disruption and APOE genotype in Alzheimer's disease: A lagged functional connectivity study. *PLOS ONE, 7*(9), e46289.

Cauda, F., Costa, T., Torta, D. M., Sacco, K., D'Agata, F., & Duca, S., … Vercelli, A. (2012). Meta-analytic clustering of the insular cortex: Characterizing the meta-analytic connectivity of the insula when involved in active tasks. *Neuroimage, 62*(1), 343–355.

Cheng, L., Yuan, J. J., He, Y. Y., & Li, H. (2009). Emotion regulation strategies: Cognitive reappraisal is more effective than expressive suppression. *Advances in Psychological Science, 17*(4), 730–735.

[程利，袁加锦，何媛媛，李红. (2009). 情绪调节策略：认知重评优于表达抑制. *心理科学进展, 17*(4), 730–735.]

Cui, X. J., Lu, C. J., Guo, Y. F., & Shi, H. M..(2012). The relationship between emotion regulation and depression of college students. *China Journal of Health Psychology, 20*(3), 431–433.

[崔向军，逯春洁，郭永芳，石贺敏. (2012). 大学生情绪调节与抑郁的相关研究. *中国健康心理学杂志, 20*(3), 431–433.]

D' Avanzato C., Joormann, J., Siemer, M., & Gotlib, I. H. (2013). Emotion regulation in depression and anxiety: Examining diagnostic specificity and stability of strategy use. *Cognitive Therapy and Research, 37*(5), 968–980.

Deak, A., Bodrogi, B., Biro, B., Perlaki, G., Orsi, G., & Bereczkei, T. (2017). Machiavellian emotion regulation in a cognitive reappraisal task: An fMRI study. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience, 17*(3), 528–541.

Dennis, T. A. (2007). Interactions between emotion regulation strategies and affective style: Implications for trait anxiety versus depressed mood. *Motivation and Emotion, 31*(3), 200–207.

Dennis, T. A., & Hajcak, G. (2009). The late positive potential: A neurophysiological marker for emotion regulation in children. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, 50*(11), 1373–1383.

Dolcos, F., Labar, K. S., & Cabeza, R. (2004). Interaction between the amygdala and the medial temporal lobe memory system predicts better memory for emotional events. *Neuron, 42*(5), 855–863.

Dougal, S., Phelps, E. A., & Davachi, L. (2007). The role of medial temporal lobe in item recognition and source recollection of emotional stimuli. *Cognitive Affective & Behavioral Neuroscience, 7*(3), 233–242.

Drabant, E. M., Mcrae, K., Manuck, S. B., Hariri, A. R., & Gross, J. J. (2008). Individual differences in typical reappraisal use predict amygdala and prefrontal responses. *Biological Psychiatry, 65*(5), 367–373.

Duncan, J., & Owen, A. M., (2000). Common regions of the human frontal lobe recruited by diverse cognitive demands. *Trends in Neurosciences, 23*(10), 475–483.

Egner, T., Etkin, A., Gale, S., & Hirsch, J. (2008). Dissociable neural systems resolve conflict from emotional versus nonemotional distracters. *Cerebral Cortex, 18*(6), 1475–1484.

Egner, T., & Hirsch, J. (2005). Cognitive control mechanisms resolve conflict through cortical amplification of task-relevant information. *Nature Neuroscience, 8*, 1784–1790.

Ertl, M., Hildebrandt, M., Ourina, K., Leicht, G., & Mulert, C. (2013). Emotion regulation by cognitive reappraisal - The role of frontal theta oscillations. *NeuroImage, 81*(11), 412–421.

Etkin, A., Egner, T., Peraza, D. M., Kandel, E. R., & Hirsch, J. (2006). Resolving emotional conflict: A role for the rostral anterior cingulate cortex in modulating activity in the amygdala. *Neuron, 51*(6), 871–882.

Foti, D., & Hajcak, G. (2008). Deconstructing reappraisal: Descriptions preceding arousing pictures modulate the subsequent neural response. *Journal of Cognitive Neuroscience, 20* (6), 977–988.

Fraga González, G., Van der Molen, M., Žarić, G., Bonte, M., Tijms, J., Blomert, L., … Van der Molen, M. W. (2016). Graph analysis of EEG resting state functional networks in dyslexic readers. *Clinical Neurophysiology, 127*(9), 3165–3175.

Frank, D. W., Dewitt M., Hudgens-Haney, M., Schaeffer, D. J., Ball, B. H., Schwarz, N. F., … Sabatinelli, D. (2014). Emotion regulation: Quantitative meta-analysis of functional activation and deactivation. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews, 45*, 202–211.

Gan, T., Luo, Y. J., & Zhang, Z. J. (2009). The Influence of Emotion on Time Perception. *Journal of Psychological Science, 32*(4), 836–839.

[甘甜，罗跃嘉，张志杰. (2009). 情绪对时间知觉的影响. *心理科学, 32*(4), 836–839.]

Garnefski, N., & Kraaij, V. (2007). The Cognitive Emotion Regulation Questionnaire: Psychometric features and prospective relationships with depression and anxiety in adults. *European Journal of Psychological Assessment, 23*, 141–149.

Giuliani, N. R., Drabant, E. M., Bhatnagar, R., & Gross, J. J. (2011a). Emotion regulation and brain plasticity: Expressive suppression use predicts anterior insula volume. *Neuroimage, 58*(1), 10–15.

Giuliani, N. R., Drabant, E. M., & Gross, J. J. (2011b). Anterior cingulate cortex volume and emotion regulation: Is bigger better? *Biological Psychology, 86*(3), 379–382.

Goldin, P. R., McRae, K., Ramel, W., & Gross, J. J. (2008). The neural bases of emotion regulation: Reappraisal and suppression of negative emotion. *Biological Psychiatry, 63*(6), 577–586.

Gross, J. J. (1998). The emerging field of emotion regulation: An integrative review. *Review of General Psychology, 2*(3), 271–299.

Gross, J. J. (2002). Emotion regulation: Affective, cognitive, and social consequences. *Psychophysiology, 39*(3), 281–291.

Gross, J. J. (2015). Emotion regulation: Current status and future prospects. *Psychological Inquiry, 26*(1), 1–26.

Gross, J. J., & John, O. P. (2003). Individual differences in two emotion regulation processes: Implications for affect, relationships, and well-being. *Journal of Personality and Social Psychology, 85*(2), 348–362.

Gu, H., Chen, Q., Xing, X., Zhao, J., & Li, X. (2019). Facial emotion recognition in deaf children: Evidence from event-related potentials and event-related spectral perturbation analysis. *Neuroscience Letters, 703*, 198–204.

Haga, S. M., Kraft, P., & Corby, E. K. (2009). Emotion regulation: Antecedents and well-being outcomes of cognitive reappraisal and expressive suppression in cross-cultural samples. *Journal of Happiness Studies, 10*(3), 271–291.

Hajcak, G., & Nieuwenhuis, S. (2006). Reappraisal modulates the electrocortical response to unpleasant pictures. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience, 6*(4), 291–297.

Hamann, S. (2001). Cognitive and neural mechanisms of emotional memory. *Trends in Cognitive Sciences, 5*(9), 394–400.

Hermann, A., Bieber, A., Keck, T., Vaitl, D., & Stark, R. (2014). Brain structural basis of cognitive reappraisal and expressive suppression. *Social Cognitive & Affective Neuroscience, 9*(9), 1435–1442.

Hermann, A., Leutgeb, V., Scharmüller, W., Vaitl, D., & Stark, R. (2013). Individual differences in cognitive reappraisal usage modulate the time course of brain activation during symptom provocation in specific phobia. *Biology of Mood and Anxiety Disorders, 3*(1), 16.

Hofmann, S. G., Heering, S., Sawyer, A. T., & Asnaani, A. (2009). How to handle anxiety: The effects of reappraisal, acceptance, and suppression strategies on anxious arousal. *Behaviour Research and Therapy, 47*(5), 389–394.

Karamacoska, D., Barry, R. J., & Steiner, G. Z. (2017). Resting state intrinsic EEG impacts on go stimulus-response processes. *Psychophysiology, 54*(6), 894–903.

Karamacoska, D., Barry, R. J., Steiner, G. Z., Coleman, E. P., & Wilson, E. J. (2018). Intrinsic EEG and task-related changes in EEG affect go/nogo task performance. *International Journal of Psychophysiology,* S0167876017306864.

Krach, S., Jansen, A., Krug, A., Markov, V., Thimm, M., Sheldrick, A. J., … Kircher, T. (2010). Comt genotype and its role on hippocampal-prefrontal regions in declarative memory. *Neuroimage, 53*(3), 978–984.

Samuelson, K. W. (2011). Post-traumatic stress disorder and declarative memory functioning: A review. *Dialogues in Clinical Neuroscience, 13*(3), 346–351.

Langer, N., Pedroni, A., Gianotti, L. R. R., Hänggi, J., Knoch, D., & Jäncke, L. (2012). Functional brain network efficiency predicts intelligence. *Human Brain Mapping, 33*(6), 1393–1406.

Langner, C. A., Epel, E., Matthews, K., Moskowitz, J. T., & Adler, N. (2012). Social hierarchy and depression: The role of emotion suppression. *Journal of Psychology, 146*(4), 417–436.

Langeslag, S. J. E., Jansma, B. M., Franken, I. H. A., & Strien, J. W. V. (2007). Event-related potential responses to love-related facial stimuli. *Biological Psychology, 76*(1-2), 109–115.

Langeslag, S. J. E., & van Strien, J. W. (2017). Preferential processing of task-irrelevant beloved-related information and task performance: Two event-related potential studies. *Neuropsychologia,* S002839321730341X.

Lee, T. W., Dolan, R. J., & Critchley, H. D. (2008). Controlling emotional expression: Behavioral and neural correlates of nonimitative emotional responses. *Cerebral Cortex, 18*(1), 104–113.

Li, X., Lu, J., Li, B., Li, H., Jin, L., & Qiu, J. (2017). The role of ventromedial prefrontal cortex volume in the association of expressive suppression and externally oriented thinking. *Journal of Affective Disorders, 222*, 112–119.

Li, Z. Q., Wang, L., Zhang, H. C., & Liu, H. C. (2010). Personality traits and subjective well-being: The mediating role of emotion regulation. *Journal of Psychological Science, 33*(1), 165–167.

[李中权，王力，张厚粲，柳恒超. (2010). 人格特质与主观幸福感：情绪调节的中介作用. *心理科学，33*(1), 165–167.]

Liu, X., Banich, M. T., Jacobson, B. L., & Tanabe, J. L. (2004). Common and distinct neural substrates of attentional control in an integrated Simon and spatial Stroop task as assessed by event-related fMRI. *Neuroimage, 22*(3), 1097–1106.

Lou, Y. X., Cai, A. Y., Yang, J. M., & Yuan, J. J. (2014).The impact of introversion-extraversion on emotion regulations and the neurophysiological underpinnings. *Advances in Psychological Science, 22*(12), 1855–1866.

[娄熠雪, 蔡阿燕, 杨洁敏, 袁加锦. (2014). 内–外倾人格对情绪调节的影响及神经机制. *心理科学进展, 22(12)*, 1855–1866.]

Makris, N., Goldstein, J. M., Kennedy, D., Hodge, S. M., Caviness, V. S., & Faraone, S. V., … Seidmancdfi L. J. (2006). Decreased volume of left and total anterior insular lobule in schizophrenia. *Schizophrenia Research, 83*(2-3), 155–171.

Mcrae, K., Hughes, B., Chopra, S., Gabrieli, J. D. E., Gross, J. J., & Ochsner, K. N. (2010). The neural bases of distraction and reappraisal. *Journal of Cognitive Neuroscience, 22*(2), 248–262.

Miller, E. K., & Cohen, J. D. (2001). An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual Review of Neuroscience, 24,* 167–202.

Moore, S. A., Zoellner, L. A., & Mollenholt, N. (2008). Are expressive suppression and cognitive reappraisal associated with stress-related symptoms?. *Behaviour Research and Therapy, 46*(9), 993–1000.

Moser, J. S., Hajcak, G., Bukay, E., & Simons, R. F. (2006). Intentional modulation of emotional responding to unpleasant pictures: An ERP study. *Psychophysiology, 43*(3), 292–296.

Nallasamy, N., & Tsao, D. Y. (2011). Functional connectivity in the brain: Effects of anesthesia. *The Neuroscientist, 17*(1), 94–106.

Nelson, B. D., Fitzgerald, D. A., Klumpp, H., Shankman, S. A., & Phan, K. L. (2015). Prefrontal engagement by cognitive reappraisal of negative faces. *Behavioural Brain Research, 279,* 218–225.

Ochsner, K. N., Bunge, S. A., Gross, J. J., & Gabrieli, J. D. E.(2002). Rethinking feelings: An FMRI study of the cognitive regulation of emotion. *Journal of Cognitive Neuroscience, 14*(8), 1215–1229.

Ochsner, K. N., Hughes, B., Robertson, E. R., Cooper, J. C., & Gabrieli, J. D. E. (2009). Neural systems supporting the control of affective and cognitive conflicts. *Journal of Cognitive Neuroscience, 21*(9), 1841–1854.

Ohira, H., Nomura, M., Ichikawa, N., Isowa, T., Iidaka, T., Sato, A., … Yamada, J.(2006). Association of neural and physiological responses during voluntary emotion suppression. *NeuroImage, 29*(3), 721–733.

Ohmatsu, S., Nakano, H., Tominaga, T., Terakawa, Y., Murata, T., & Morioka, S. (2014). Activation of the serotonergic system by pedaling exercise changes anterior cingulate cortex activity and improves negative emotion. *Behavioural Brain Research, 270,* 112–117.

Pagani, M., Di Lorenzo, G., Verardo, A. R., Nicolais, G., Monaco, L., & Lauretti, G., … Siracusano, A. (2012). Neurobiological correlates of EMDR monitoring - An EEG study. *PLOS ONE, 7*(9), e45753.

Pan, J., Zhan, L., Hu, C. L., Yang, J., Wang, C., Gu, L., … Wu, X. (2018). Emotion regulation and complex brain networks: Association between expressive suppression and efficiency in the fronto-parietal network and default-mode network. *Frontiers in Human Neuroscience, 12*, 70.

Pannu, H. J., Morey, R. A., Petty, C. M., Srishti, S., Smoski, M. J., Gregory, M. C., & Labar K. S. (2010). Staying cool when things get hot: Emotion regulation modulates neural mechanisms of memory encoding. *Frontiers in Human Neuroscience, 4,* 230.

Pascual-Marqui, R. D., Lehmann, D., Koukkou, M., Kochi, K., Anderer, P., Saletu, B., … Kinoshita, T. (2011) Assessing interactions in the brain with exact low resolution electromagnetic tomography. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 369*, 3768–3784.

Pei, X., Wang, J., Deng, B., Wei, X., & Yu, H. (2014). Wlpvg approach to the analysis of eeg-based functional brain network under manual acupuncture. *Cognitive Neurodynamics, 8*(5), 417–428.

Phan, K. L., Fitzgerald, D. A., Nathan, P. J., Moore, G. J., Uhde, T. W., & Tancer, M. E. (2005). Neural substrates for voluntary suppression of negative affect: A functional magnetic resonance imaging study. *Biological Psychiatry, 57*(3), 210–219.

Qian, L., Xi, C., Tom, H., Duo, X., Frederick, C., & James, B. R. (2014). Theta band activity in response to emotional expressions and its relationship with gamma band activity as revealed by MEG and advanced beamformer source imaging. *Frontiers in Human Neuroscience, 7*, 940.

Scult, M. A., Knodt, A. R., Swartz, J. R., Brigidi, B. D., & Hariri, A. R. (2017). Thinking and feeling: Individual differences in habitual emotion regulation and stress-related mood are associated with prefrontal executive control. *Clinical Psychological Science, 5*(1), 150–157.

Sheline, Y. I., Price, J. L., Yan, Z., & Mintun, M. A. (2010). Resting-state functional MRI in depression unmasks increased connectivity between networks via the dorsal nexus. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 107*(24), 11020–11025.

Shigeto, H., Ishiguro, J., & Nittono, H. (2011). Effects of visual stimulus complexity on event-related brain potentials and viewing duration in a free-viewing task. *Neuroscience Letters, 497*(2), 85–89.

Stam, C. J., Nolte, G., & Daffertshofer, A. (2007). Phase lag index: Assessment of functional connectivity from multichannel EEG and MEG with diminished bias from common sources. *Human Brain Mapping, 28*(11), 1178–1193.

Szaflarski, J. P., Allendorfer, J. B., Heyse, H., Mendoza, L., Szaflarski, B. A., & Cohen, N. (2014). Functional mri of facial emotion processing in left temporal lobe epilepsy. *Epilepsy & Behavior, 32*, 92–99.

Urbain, C., Sato, J., Pang, E. W., & Taylor, M. J. (2017). The temporal and spatial brain dynamics of automatic emotion regulation in children. *Developmental Cognitive Neuroscience, 26,* 62–68.

van den Heuvel, M. P., Stam, C. J., Kahn, R. S., & Hulshoff Pol, H. E. (2009). Efficiency of functional brain networks and intellectual performance. *Journal of Neuroscience, 29*(23), 7619–7624.

van den Heuvel, M. P., & Hulshoff Pol, H. E. (2010). Exploring the brain network: A review on resting-state fMRI functional connectivity. *European Neuropsychopharmacology, 20*(8), 519–534.

Vanderhasselt, M. A., Kuhn, S., & De Raedt, R. (2013). "Put on your poker face": Neural systems supporting the anticipation for expressive suppression and cognitive reappraisal. *Social Cognitive and Affective Neuroscience, 8*(8), 903–910.

van Diessen, E., Numan, T., van Dellen, E., van der Kooi,

A.W., Boersma, M., Hofman D., … Stam, C. J. (2015). Opportunities and methodological challenges in EEG and MEG resting state functional brain network research. *Clinical Neurophysiology, 126*(8), 1468–1481.

Varnum, M. E. W., & Hampton, R. S. (2016). Cultures differ in the ability to enhance affective neural responses. *Social Neuroscience, 12*(5), 1–10.

Viviani, R. (2014). Neural correlates of emotion regulation in the ventral prefrontal cortex and the encoding of subjective value and economic utility. *Frontiers in Psychiatry, 5*.

Wagner, M., Fuchs, M., & Kastner, J. (2004). Evaluation of sLORETA in the presence of noise and multiple sources. *Brain Topography, 16*(4), 277–280.

Wang, J. X., Wang, C. M., Xie, F., Chang, M., & Zhang, K. (2015). The effect of cognitive reappraisal and distraction in regulating negative emotion: ERPs study. *Journal of Psychological Science, 38*(5), 1039–1044.

[王敬欣, 王春梅, 谢芳, 常敏, 张阔. (2015). 负性情绪调节中认知重评和分心策略的作用: ERPs 研究. *心理科学, 38*(5), 1039–1044.]

Wang, J., Wang, X., Xia, M., Liao, X., Evans, A., & He, Y. (2015). Gretna: A graph theoretical network analysis toolbox for imaging connectomics. *Frontiers in Human Neuroscience, 9*.

Wang, J., Zuo, X., & He, Y. (2010). Graph-based network analysis of resting-state functional MRI. *Frontiers in Systems Neuroscience, 4*.

Wang, K., Huang, H., Chen, L., Hou, X., Zhang, Y., Yang, J., … Qiu, J. (2017). MRI correlates of interaction between gender and expressive suppression among the Chinese population. *Neuroscience, 347*, 76–84.

Wang, L., Liu, H. C., Li, Z. Q., & Du, W.(2007). Reliability and validity of emotion regulation questionnaire Chinese revised version. *China Journal of Health Psychology, 15*(6), 503–505.

[王力, 柳恒超, 李中权, 杜卫. (2007). 情绪调节问卷中文版的信效度研究. *中国健康心理学杂志, 15*(6), 503–505.]

Wang, Y. N., Zhou, L. M., Qu, C., & Luo, Y. J. (2007). Implicitly processing of affective connotation of chinese words evidence from event-related brain potential. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 43*(4), 466–470.

[王一牛, 周立明, 曲琛, 罗跃嘉. (2007). 感情色彩双字词内隐加工的 ERP 研究. *北京师范大学学报(自然科学版), 43*(4), 466–470.]

Xing, M., Tadayonnejad, R., MacNamara A., Ajilore, O., Phan, K. L., Klumpp, H., & Leow, A. (2016). *EEG based functional connectivity reflects cognitive load during emotion regulation*. IEEE International Symposium on Biomedical Imaging. IEEE.

Zhang, W., Li, X., Liu, X., Duan, X., Wang, D., & Shen, J. (2013). Distraction reduces theta synchronization in emotion regulation during adolescence. *Neuroscience Letters, 550*, 81–86.

Zhao, L.Y., Tian, J., Wang, W., Qin, W., Shi, J., Li, Q., … Lu, L. (2012). The role of dorsal anterior cingulate cortex in the regulation of craving by reappraisal in smokers. *PLOS ONE, 7*(8), e43598.

Zhou, Y., Yu, C., Zheng, H., Liu, Y., Song, M., Qin, W., … Jiang, T. (2010). Increased neural resources recruitment in the intrinsic organization in major depression. *Journal of Affective Disorders, 121*(3), 220–230.

Brain network analysis of cognitive reappraisal and expressive inhibition strategies: Evidence from EEG and ERP

SUN Yan; BO Siyu; LV Jiaojiao

(*School of Psychology, Liaoning Normal University, Dalian* 116029, *China*)

Abstract

The ability to regulate emotions is related to psychological, social, and physical health. The two major emotion regulation strategies are cognitive reappraisal (CR) and expressive suppression (ES). Research suggests that CR produces affective, cognitive, and social consequences that are more beneficial to the individual, whereas ES has been consistently linked to more detrimental consequences. Although an increasing number of studies have begun to focus on the neural mechanisms of different types of emotion regulation, there has not yet been systematic research on the spontaneous brain activity associated with CR and ES. Resting activity has been shown to predict performance outcomes, highlight the functional relevance of the brain's intrinsic fluctuations in response outputs. However, to date, there have been no studies to explore the relationship between the cognitive process of emotion regulation and the brain's resting EEG activity.

The current study explored the neural mechanisms of spontaneous brain activity during two emotion regulation strategies. Electroencephalography (EEG) enables direct measurement of neuronal activity, allowing characterization of the intrinsic neural cognitive network. Thirty-six college students (17 males and 19 females, aged 17~28 years old) participated in this study. For the first part of the study, EEG data was collected from participants with closed eyes; EEG collection occurred for a duration of 6 minutes. Neurological studies of resting state EEG have identified the predominant role of theta waves in determining cognitive control effort and behavioral performance. In the current study, source localization and graph theory analysis revealed that node efficiency was significantly correlated with the two major emotion regulation strategies, and there were functional connections between brain regions in the theta band.

Then, in order to improve the reliability of the resting result obtained above, a within subjects experiment was carried out. This experiment required subjects to watch emotional pictures under four emotion regulation conditions (watching neutral, watching negative, reappraisal negative, suppressing negative). The Late-positive potential (LPP) amplitude was obtained when viewing the emotional pictures under the four conditions. LPP is an effective physiological indicator of the emotion regulation effect. It allowed us to explore the emotion regulation effect under different emotion regulation strategies, and the intrinsic functional connections and node efficiency of the brain.

The results showed that the habitual use of CR was significantly correlated with several brain regions. Specifically, the prefrontal cortex, anterior cingulate, and parietal cortex. Moreover, the brain regions significantly correlated with the LPP amplitude under CR were the parietal cortex, prefrontal cortex, parahippocampal gyrus, and occipital cortex. The brain regions that were significantly correlated with habitual use of ES included the prefrontal cortex, parietal cortex, insula, and parahippocampal gyrus. Finally, the brain regions that were significantly associated with LPP amplitude under ES included the prefrontal cortex, parietal cortex, parahippocampal gyrus, temporal cortex, and occipital cortex. Thus, these findings reveal that many brain regions are involved in these two mood regulation strategies, including the prefrontal cortex, parahippocampal gyrus, parietal cortex, and occipital cortex. In addition, the brain regions related to the different emotion regulation strategies differed slightly; specifically, CR was significantly associated with the anterior cingulate cortex while ES was related to temporal lobe and insula activation.

In conclusion, the results of this study indicate that use of CR for emotion regulation is associated with activation of multiple brain regions including the prefrontal cortex, anterior cingulate cortex, parietal cortex, parahippocampal gyrus and occipital cortex. On the other hand, the use of ES for emotional regulation was associated with activation of various brain regions including the prefrontal cortex, parietal cortex, parahippocampal gyrus, occipital cortex, temporal cortex and insula. Node efficiency or functional connectivity of these brain regions appears to be a suitable indicator for assessing the effects of the ES and CR emotion regulation strategies.

Key words emotion regulation; cognitive reappraisal; expressive suppression; functional connection; graph theory